

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210271

电磁超声全向导波换能器辐射控制方法研究^{*}

邢燕好¹,王振宇¹,张佳¹,孙盈²,金香³
(1. 沈阳工业大学信息科学与工程学院 沈阳 110870; 2. 中国兵器工业集团航空弹药研究院有限公司 哈尔滨 150030;
3. 包头师范学院 包头 014030)

摘 要:针对传统电磁超声全向导波换能器因导波内、外辐射致使检测回波信号复杂及信噪比低的问题,设计了一种新型电磁超声全向导波换能器(OUT-EMAT)结构,研究了换能器双线圈结构参数、双激励源控制方法,实现了导波辐射强度与方向控制。根据电磁超声全向换能器理论,建立波动位移叠加的数学模型,并对设计的 OUT-EMAT 性能进行仿真计算及实验。研究结果表明:与传统全向 EMAT 相比,OUT-EMAT 内、外辐射导波强度之比由 1:1 变为 2:9;其外辐射导波强度增加了 100%,内辐射导波强度抑制了 55.6%;增强了检测回波信噪比,降低了信号复杂度,提高了裂纹缺陷定位准确度;为有效识别裂纹缺陷提供了一种新方法,对实际工程应用具有指导意义。
关键词: OUT-EMAT; 双线圈结构; 波动位移; 内、外辐射; 裂纹缺陷
中图分类号: TB553 TH89 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

Research on the radiation control method of electromagnetic ultrasonic omnidirectional guided wave transducer

Xing Yanhao¹, Wang Zhenyu¹, Zhang Jia¹, Sun Ying², Jin Xiang³
(1. School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;
2. China North Industries Group Aviation Ammunition Research Institute Co., Ltd., Harbin 150030, China;
3. Baotou Normal College, Baotou 014030, China)

Abstract: To solve the problem of complex echo signal and low signal-to-noise ratio caused by internal and external radiation of guided wave in the traditional electromagnetic ultrasonic omnidirectional guided wave transducer, a novel electromagnetic ultrasonic omnidirectional guided wave transducer (OUT-EMAT) is designed. The control method of double coil parameters and double excitation source is studied. The intensity and direction of guided wave radiation are controlled. According to the theory of the electromagnetic ultrasonic omnidirectional transducer, the mathematical model of wave displacement superposition is formulated, and the performance of OUT-EMAT is simulated and tested. Compared with the traditional omnidirectional EMAT, Simulation results show that the OUT-EMAT makes the ratio of internal and external radiation guided wave amplitudes change from 1:1 to 2:9. The external radiation is enhanced about 100% and the internal radiation is suppressed about 55.6%. The new OUT-EMAT enhances the signal to noise ratio of detection echo, reduces the complexity of signal and improves the accuracy of crack location. It provides a new method for identifying crack defect effectively, which has guiding significance for practical engineering application.
Keywords: OUT-EMAT; double excitation coil; wave displacement; internal and external radiation; crack defect

0 引 言

金属材料的应用越来越广且需求量迅速增加^[1]。然而,由于金属板材在制造、成形过程中难免带有裂纹、划伤等缺陷;且在其服役期间受到荷载冲击、应力集中及环境等因素的作用,很容易在局部区域产生疲劳损伤,进而影响整个结构的性能和安全,造成灾难性后果^[2-4],因此

收稿日期:2022-08-07 Received Date: 2022-08-07
^{*} 基金项目:2021 年辽宁省教育厅面上项目(LJKZ0135)、2022 年辽宁省自然科学基金计划项目(2022-BS-180)资助

无损检测技术具有重要意义。电磁超声检测方法属于无损检测的一种,适用于管、板、罐等检测^[5-7],具有非接触、无需耦合、对人体无害、可在不同环境下做现场检测等优势,应用前景广阔^[8]。

现阶段国内外学者利用电磁超声导波技术进行裂纹缺陷检测研究,实现了单一周向^[9]、轴向^[10]、螺旋向^[11]导波的发射和接收,可对单一方向裂纹缺陷进行检测。目前国内外学者对全向导波的研究主要围绕导波模态控制降低回波复杂程度和接收回波信号的优化增强等方面。Lee 等^[12]设计了双环状螺旋线圈结构的全向电磁超声换能器 (electromagnetic acoustic transducer, EMAT), 利用双环状螺旋线圈可以实现单一 S0 模态全向型 Lamb 波的发射。Liu 等^[13-14]进行了全向磁选式电磁超声换能器的研究,通过正交实验优化全向磁选式电磁超声换能器的结构,实现了采用全向磁集中器增强全向电磁超声换能器信号;且该团队提出了一种新型全向电磁超声换能器结构,利用螺旋曲折全向线圈和新型异极性同心永磁铁组合实现了单一 A0 模态全向 Lamb 波发射和 A0 模态信号的增强。Kim 等^[15]对全向 Lamb 波磁致伸缩贴片换能器中的贴片缝隙与换能器输出影响关系进行了研究,通过对贴片中引入径向狭缝,使得传感器输出功率增加。Yang 等^[16]设计了栅型网格线圈,实现了轴向和周向两个方向导波的同时激发,并进行了管道周向和轴向裂纹缺陷的检测实验。综上所述,通过对全向导波内、外辐射传播方向控制实现信号复杂度降低和信噪比提升的问题国内外尚未解决。

本文以降低回波信号复杂程度和提升信噪比强度为研究目标,基于传统电磁超声全向导波换能器所激发的超声波分别向内、外辐射的传播机理,提出一种新型电磁超声换能器 (omnidirectional outward radiation electromagnetic acoustic transducer, OUT-EMAT) 结构设计,对全向导波外辐射传播控制展开研究。建立钢板中电磁超声全向换能器波动位移叠加的数学模型;对 OUT-EMAT 的多物理场换能机理进行有限元建模和仿真分析,通过仿真与实验研究验证 OUT-EMAT 降低回波复杂程度以及增强回波信噪比的能力。

1 全向 EMAT 原理分析

电磁超声全向导波换能器包括全向线圈、永磁铁、被测工件。永磁铁提供静态偏置磁场,与通入全向线圈的交变电流相互作用,在被测工件表面感生涡流,使工件内部质点振动产生全向导波^[17]。

1.1 全向 EMAT 换能机理

全向 EMAT 激励导波的过程涉及电学、磁学、力学、声学等多物理场学科理论,电磁超声全向导波换能原理可用麦克斯韦方程表示为^[18]:

$$\nabla \times H_d = J_0 \quad (1)$$

$$B_d = \mu_m H_d \quad (2)$$

$$\nabla \times E_E = \frac{\partial B_d}{\partial t} \quad (3)$$

$$J_e = \gamma E_E \quad (4)$$

式中: ∇ 为哈密算子; H_d 为交变磁场的磁场强度; J_0 为激励电流密度; B_d 为交变磁感应强度; μ_m 为工件的相对磁导率; E_E 为涡流产生的电场强度; J_e 为涡流密度; γ 为工件的电导率。传统电磁超声全向换能器原理如图 1 所示。

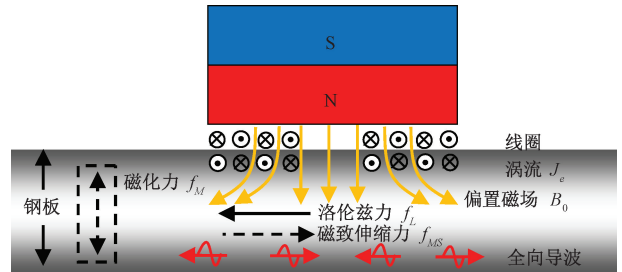


图 1 传统电磁超声全向换能器二维截面图

Fig. 1 Two-dimensional section of the conventional electromagnetic ultrasonic omnidirectional transducer

图 1 中,传统电磁超声全向导波换能器激励的超声波分别向内、外辐射传播,即指向圆心传播的内辐射波和由圆心向外传播的外辐射波。

在铁磁性工件中,质点受到洛伦兹力 f_L 、磁致伸缩力 f_{MS} 、磁化力 f_M 三种作用力,在 3 种力的共同作用下形成波动位移^[19-21],产生全向导波。 $f_L f_{MS} f_M$ 的表达式如下:

$$f_L = B_0 \times J_e + B_d \times J_e \quad (5)$$

$$f_{MS} = -\nabla_i (\mathbf{e}^T H_d) \quad (6)$$

$$f_M = \mu_0 (\nabla H) \cdot M = \mu_0 (\nabla (H_d + H_0)) \cdot M \quad (7)$$

$$f = f_L + f_{MS} + f_M \quad (8)$$

式中: B_0 为偏置磁场磁感应强度; $\mathbf{e}$ 为逆压磁矩阵; M 为磁化强度; H_0 为静态偏置磁场强度。

1.2 全向 EMAT 传播机理

传统电磁超声全向导波换能器在钢板中的传播机理包括导波发射机理以及回波接收机理。

1) 导波发射机理

在全向 EMAT 中,永磁铁固定,静态偏置磁场磁感应强度保持不变,根据式 (5) ~ (8) 钢板中受静态磁场强度影响的作用力保持不变,故分析钢板中受动态磁场强度影响的作用力。全向线圈中工作导线闭合回路可等效为半径为 R 的闭合曲线圆 O ,以圆 O 的圆心为坐标原点建立 $Oxyz$ 的直角坐标系。全向导波线圈等效闭合回路的数学模型如图 2 所示。

如图 2 所示,等效闭合曲线圆 O 位于 Oxy 平面内, $P(x, y, z)$ 点为空间内任意一点,载流线元 Idl 在 P 点产

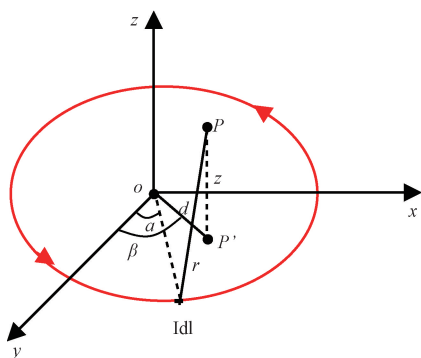


图2 磁场数学模型

Fig. 2 Magnetic field mathematical model

生的磁感应强度由毕奥-萨伐尔定律给出^[22]。毕奥-萨伐尔定律如式(9)所示。

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times \vec{r}}{r^3} \quad (9)$$

式中: μ_0 为真空中的磁导率, I 为线圈中电流, $d\vec{l}$ 为线圈中电流的微小线元素, r 为空间中任意一点到载流导线的距离。

图2中,载流元 Idl 与 y 轴夹角为 $\alpha + \pi/2$, $\vec{i}$ 、 $\vec{j}$ 分别为 x 轴、 y 轴的方向向量,则:

$$d\vec{l} = R d\alpha (\cos \alpha \vec{i} - \sin \alpha \vec{j}) \quad (10)$$

Idl 到 P 的距离为:

$$\vec{r} = (d \sin \beta - R \sin \alpha) \vec{i} + (d \cos \beta - R \cos \alpha) \vec{j} + z \vec{k} \quad (11)$$

运用矢量叉乘,可得:

$$Idl \times \vec{r} = R d\alpha \{-z \sin \alpha \vec{i} - z \cos \alpha \vec{j} + [d \cos(\alpha - \beta) - R \cos \alpha] \vec{k}\} \quad (12)$$

将式(12)代入式(9)并积分,可得 P 点磁感强度沿 x 、 y 、 z 方向分量分别为:

$$B_x = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \sin \alpha d\alpha}{[R^2 + d^2 + z^2 - 2Rd \cos(\alpha - \beta)]^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{z \cos \alpha d\alpha}{[R^2 + d^2 + z^2 - 2Rd \cos(\alpha - \beta)]^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

$$B_z = \frac{\mu_0 IR}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{[d \cos(\alpha - \beta) - R] d\alpha}{[R^2 + d^2 + z^2 - 2Rd \cos(\alpha - \beta)]^{\frac{3}{2}}} \quad (15)$$

P 点在 Oxy 平面上的投影点为 P' ,坐标为 $(d \sin \beta, d \cos \beta)$ 。式中: d 为 P 点到 Oxy 平面投影点 P' 到圆心 O 的距离; R 为等效闭合曲线圆 O 的半径; z 为 P 点到 Oxy 平面投影点 P' 的距离; α 为载流元与圆心 O 的连线到 y

轴夹角; β 为 P' 点与圆心 O 的连线到 y 轴夹角。

由上式可知, R 、 z 、 d 一定时 B_z 大小一定,故钢板中质点所受合力大小一致。故全向导波可视为一个圆面向内、外辐射。

2) 回波接收机理

全向 EMAT 在实际应用过程中采用收发一体式检测方式。根据全向 EMAT 发射机理,发射的导波存在内、外辐射。内、外辐射的激励是受全向 EMAT 本身结构影响,主要由线圈结构决定。

全向线圈是关于圆心的对称结构,任意 θ 范围内换能器激励的导波均为指向线圈圆心(内辐射)和从线圈圆心向外发射(外辐射)的两种传播形式。全向导波发射如图3所示。

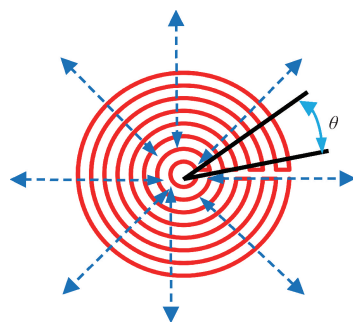


图3 全向导波发射

Fig. 3 Omnidirectional guided wave emission

图3中,换能器所激励的全向导波在任意点均向内、外辐射,遇到裂纹缺陷时,发生两次反射,导致接收到的回波信号复杂,后续数据处理时根据接收到的回波信号无法判断裂纹缺陷具体情况引起误判。

根据电磁超声全向 EMAT 发射机理,全向导波形成一个圆面向内、外辐射,裂纹处导波反射原理如图4所示。

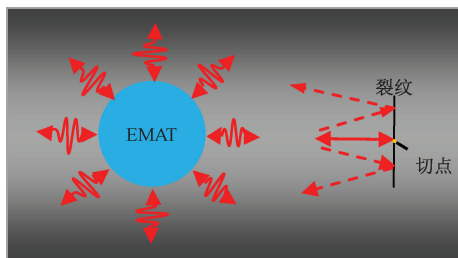


图4 裂纹处导波反射原理图

Fig. 4 Schematic of guided wave reflection at the crack

图4中,全向导波遇到裂纹缺陷时仅在切点处形成可被接收线圈接收的回波信号,此时的反射为线反射,故回波信号信噪比低。

根据传统电磁超声全向 EMAT 存在的回波信号复杂导致裂纹缺陷误判与回波信号信噪比低的问题,构建波

动位移叠加模型^[23-24],对全向导波外辐射控制展开研究,实现全向导波仅向外辐射且外辐射信号增强。

2 改进 OUT-EMAT 结构与原理分析

根据麦克斯韦方程中交变磁场的磁场强度与哈密算子、激励线圈密度、相对磁导率的函数,建立质点所受 f_{MS} 、 f_L 、 f_M 合力与波动位移的关系,构建波动位移的叠加模型。

2.1 OUT-EMAT 原理

钢板中质点波动位移是由 f_{MS} 、 f_L 、 f_M 三种力共同作用产生,3种力引起质点波动位移的机理存在差异。磁致伸缩力作用下引起质点波动位移是交变磁场作用的结果,静磁场仅对波动位移提供偏移量;洛伦兹力、磁化力作用下引起质点波动位移是由静磁场和交变磁场共同作用的结果。故 f_{MS} 、 f_L 、 f_M 位移表达式如下:

磁致伸缩力 f_{MS} 作用下质点的波动位移表达式:

$$u_{MS} = \frac{\lambda_{MS}}{2E\mu_0} \int_0^l B(\xi) e^{ik(\xi-x+vt)} d\xi \quad (16)$$

式中: u_{MS} 为磁致伸缩力作用下质点的波动位移, λ_{MS} 为磁致伸缩系数; E 为杨氏模量。

洛伦兹力、磁化力作用下质点的波动位移表达式:

$$u_{L,M} = \iint \left\{ \frac{1}{\rho} [(\lambda_m + 2\mu_m) \nabla(\nabla \cdot \mu_2) - \mu_m \nabla \times \nabla \times u_{L,M}] + \left[J_e \times (B_0 + B_d) + \nabla \left(\frac{B_0 + B_d}{\mu_r} \cdot M \right) \right] \right\} dt \quad (17)$$

式中: $u_{L,M}$ 为洛伦兹力与磁化力作用下质点的波动位移; ρ 为被测钢板密度; λ_m 、 μ_m 为拉梅常数。

EMAT产生的声波在传播过程中的数学函数为:

$$y = u \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi \right] \quad (18)$$

式中: y 为 x 轴上质点离开平衡位置的位移; u 为 EMAT 中 u_{MS} 与 $u_{L,M}$ 的矢量和; $\omega = 2\pi/T$; T 为周期; x 为平衡位移; t 为时间; v 为波速; φ 为相位。

在 OUT-EMAT 双线圈 O1、O2 中,通入相同频率与相同相位的脉冲信号,激励的两列波传播时,叠加产生的波动位移方程 y 表示为:

$$y = y_{O1} + y_{O2} = u_{O1} \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi \right] + u_{O2} \cos \left[\omega \left(t - \Delta t - \frac{x + \Delta x}{v} \right) + \varphi \right] \quad (19)$$

式中: y_{O1} 为 O1-EMAT 中 x 方向上质点离开平衡位置的位移; y_{O2} 为 O2-EMAT 中 x 方向上质点离开平衡位置的位移; u_{O1} 为 O1-EMAT 中 u_{MS} 与 $u_{L,M}$ 的矢量和; u_{O2} 为 O2-EMAT 中 u_{MS} 与 $u_{L,M}$ 的矢量和; Δt 为 O2-EMAT 中激励电流延迟 O1-EMAT 中激励电流的时间; Δx 为 O2-EMAT 中线圈导线与 O1-EMAT 中线圈导线间距。

若实现内辐射的全向导波幅值叠加后为 0,则需令: $u_{O1} = u_{O2}$,且 O1-EMAT 与 O2-EMAT 激励线圈相位差为 $nT + T/2$ (n 为周期数),但为了尽量缩小 O1-EMAT 与 O2-EMAT 间距,防止多周期的影响,令二者相位差为 $T/2$,则上式可变为:

$$\omega \left(-t - \Delta t - \frac{x + \Delta x}{v} \right) - \omega \left(-t - \frac{x}{v} \right) = \omega \times \frac{T}{2} \quad (20)$$

通过计算上式可得:

$$\begin{cases} \Delta x = \frac{\lambda}{4} \\ \Delta t = \frac{T}{4} \end{cases} \quad (21)$$

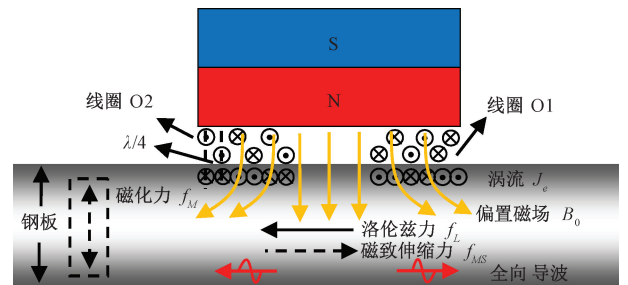
式中: λ 为波长。上式可知,当 O1-EMAT 与 O2-EMAT 中相邻导线间距为 $\lambda/4$,且 O2-EMAT 中激励时间延迟 O1-EMAT 中激励时间 $T/4$ 时,内辐射的全向导波幅值叠加为 0。由于全向 EMAT 存在内、外辐射的全向导波,当内辐射的全向导波幅值叠加为 0 时,外辐射的全向导波时间延迟表达式为:

$$\omega \left(-t - \Delta t - \frac{x + \Delta x}{v} \right) - \omega \left(-t - \frac{x}{v} \right) = 0 \quad (22)$$

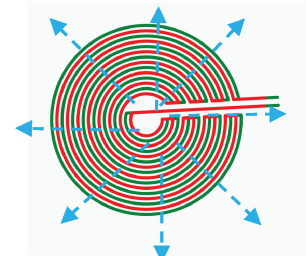
式(22)计算为 0,则外辐射的超声波相位相同,即叠加幅值为两者幅值之和,使外辐射信号幅值增强。

2.2 OUT-EMAT 结构

基于上述磁场模型以及各个作用下波动位移叠加模型,为实现内辐射全向导波抑制和外辐射全向导波幅值增强,设计的 OUT-EMAT 的原理如图 5 所示。



(a) OUT-EMAT 二维截面
(a) OUT-EMAT two-dimensional cross section



(b) OUT-EMAT 全向导波发射
(b) OUT-EMAT omnidirectional guided wave emission

图 5 OUT-EMAT 的结构及原理

Fig. 5 Structure and schematic diagram of OUT-EMAT

图5中,永磁铁提供垂直方向磁场;线圈由两个全向线圈组成,组合后线圈的相邻导线间距为 $\lambda/4$,线圈O2中电流激励时间延迟线圈O1中激励电流时间 $T/4$ 。若更改内辐射全向导波和外辐射全向导波的方向,则可通过更改线圈O1与线圈O2中的延迟时间实现。

当 $\Delta x = \lambda/4$ 时,一个周期内,线圈O2中电流激励时间延迟线圈O1中激励电流时间 $T/4$ 时,OUT-EMAT内辐射的全向导波(负半轴)和外辐射的全向导波(正半轴)位移如图6所示。

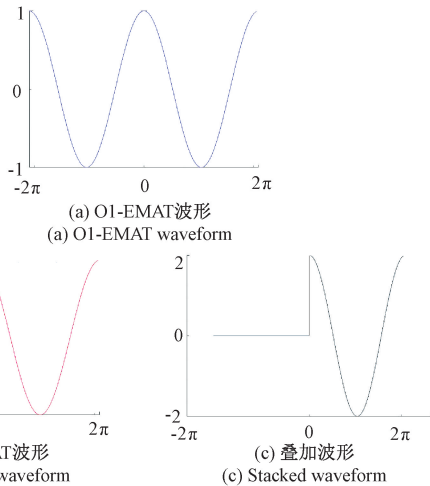


图6 O1-EMAT与O2-EMAT的叠加波形

Fig. 6 Superposition waveform of O1-EMAT and O2-EMAT

图6中,当双激励全向线圈工作, $\Delta x = \lambda/4$, $\Delta t = T/4$ 时,实现仅向外辐射全向导波,即内辐射全向导波波动位移强度叠加为0。

其工作过程描述如下:因O1线圈位于内侧,为实现双线圈产生的全向导波向外辐射,首先对O1线圈激励,将该时刻定义为0时刻,即 $t=0$ 。线圈O1作用下产生向内外辐射的全向导波。向外传播 $\lambda/4$ 声程,即O2线圈正下方时,时刻为 $t=T/4$,该瞬时时刻对O2线圈激励,使其产生与O1线圈同相位的超声波动。向外辐射时,因O1与O2线圈产生超声波动为同相位,则其合振动增强;向内辐射时,因O1与O2线圈产生超声波动为反相位,则其合振动减弱。实际传播过程中,两列波在叠加位置处的幅度存在差异或相位无法准确相同,因此合振动无法达到理论理想状态。通过对距离为 $\lambda/4$ 的双激励线圈激励时间参数的控制,可以实现电磁超声全向导波内辐射抑制和外辐射增强。

3 OUT-EMAT结构有限元仿真

为验证改进后的OUT-EMAT结构激励的全向导波内辐射抑制、外辐射增强和遇到裂纹时换能器的检测能力,建立二维有限元模型,分析换能器在钢板中的波动位移。

3.1 外辐射有限元分析

有限元仿真模型如图7所示。

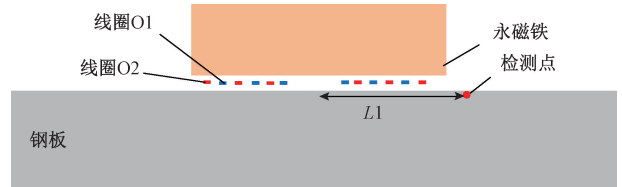


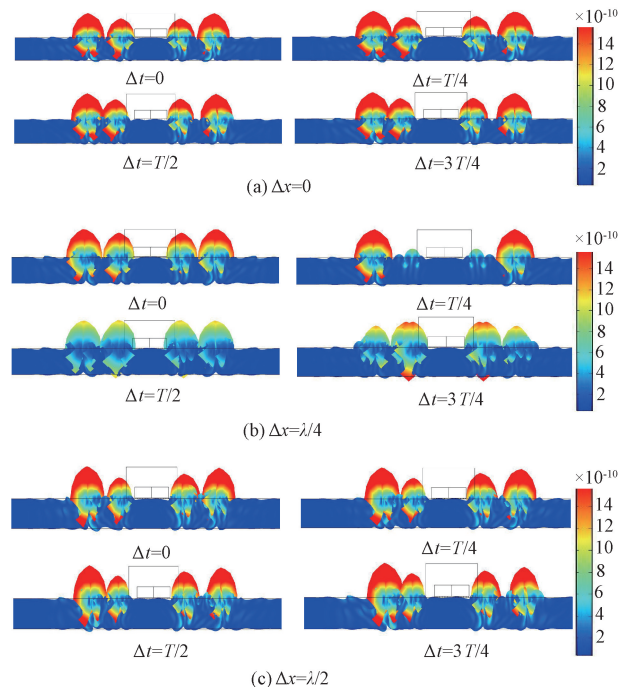
图7 有限元模型示意图

Fig. 7 Diagram of finite element model

模型中,钕铁硼永磁铁尺寸为 10×5 mm,剩磁为1.4 T。静磁场方向为垂直方向。钢板长度为150 mm、钢板厚度为14 mm,杨氏模量为210 GPa,泊松比为0.3,密度为 7800 kg/m^3 。线圈O1、O2线间距为3 mm,即OUT-EMAT线圈相邻导线间距为1.5 mm,工作导线铜带长0.2 mm、宽0.05 mm, $L1$ 为20 mm。激励信号为 $e^{(-5 \cdot (\pi^2) \cdot (0.25^2) \cdot (5e5^2) / (\log(10)) \cdot (t-10^{-6})^2) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (5e5) \cdot (t-10^{-6})) \cdot 15}$ 。

1) 外辐射控制

优化后的OUT-EMAT结构所激励的全向导波波动位移仿真结果如图8所示。



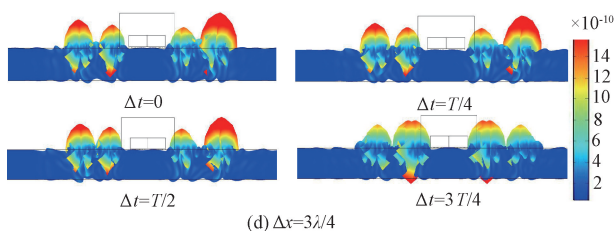


图 8 超声波位移图

Fig. 8 Diagram of ultrasound displacement

图 8 中,线圈 O1 与 O2 位置 Δx 分别为 $0, \lambda/4, \lambda/2, 3\lambda/4$, 线圈 O1 与线圈 O2 延迟时间差分别为 $0, T/4, T/2, 3T/4$ 。在一个周期内,当 $\Delta x = \lambda/4$ 和 $\Delta t = T/4$ 时存在外辐射全向导波增强,内辐射全向导波抑制。与上述理论建模分析一致。传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT 对比如图 9 所示。

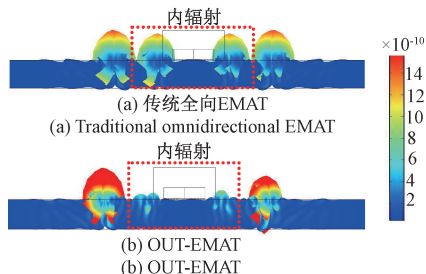


图 9 传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT 对比

Fig. 9 Comparison of traditional omnidirectional EMAT and OUT-EMAT

如图 9 所示,中间波动位移代表内辐射的全向导波,两侧为外辐射的全向导波。与传统 EMAT 相比 OUT-EMAT 内辐射的全向导波受到抑制,外辐射的全向导波明显增强。

2) 换能器参数优化

换能器参数优化有限元仿真模型如图 7 所示,在离钢板中心 20 mm 处设置检测点。

(1) 换能器频率优化

对双激励线圈输入信号频率进行调整,从 0.3 MHz 增大到 0.75 MHz,步进为 0.05 MHz。具体内辐射总位移、外辐射总位移与内外辐射之比如图 10 所示。

如图 10 所示,随着激励频率的增加 OUT-EMAT 外辐射总位移先增加后减小,内辐射先减小后增加。故在 0.45 MHz 时外辐射与内辐射之比达到最大。

(2) 换能器两路电压优化

对双激励线圈输入信号的电压进行调整,一路保持 15 V 不变,另一路从 5 V 增大到 30 V,步进为 2 V。具体内辐射总位移、外辐射总位移与内外辐射之比如图 11 所示。

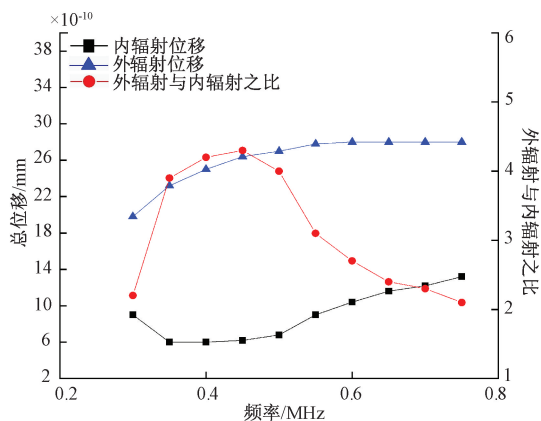


图 10 OUT-EMAT 频率对比

Fig. 10 OUT-EMAT frequency comparison

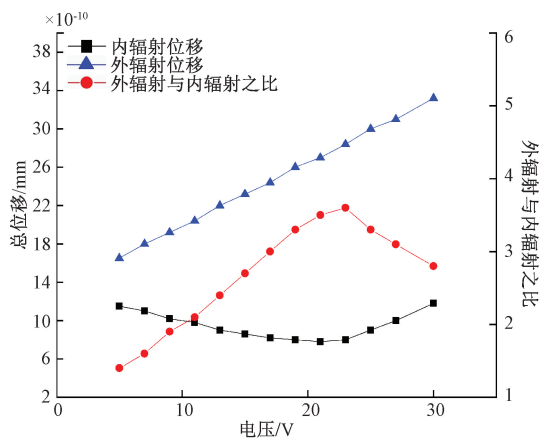


图 11 OUT-EMAT 电压对比

Fig. 11 OUT-EMAT voltage comparison

如图 11 所示,随着电压的增加 OUT-EMAT 外辐射总位移呈单调递增的趋势,内辐射先减小后增加。故在一路电压为 15 V 另一路电压为 23 V 时,外辐射与内辐射之比达到最大。

(3) 换能器提高距优化

对双激励线圈与钢板之间提高进行调整,从 0.1 mm 增大到 1 mm,步进为 0.1 mm。具体内辐射总位移、外辐射总位移与内外辐射之比如图 12 所示。

如图 12 所示,随着提高的增加 OUT-EMAT 外辐射总位移呈单调递减的趋势,内辐射也呈单调递减趋势。外辐射与内辐射之比呈递减趋势,故提高距离越小越好,若继续增大提高距离则有可能内外辐射比达到 1:1 失去抑制内辐射作用。

综上,当换能器激励频率参数为 0.45 MHz,两路电压为 15、23 V,提高为 0.1 mm 时 OUT-EMAT 激励的信号达到最优。传统全向换能器与 OUT-EMAT 对比如图 13 所示。

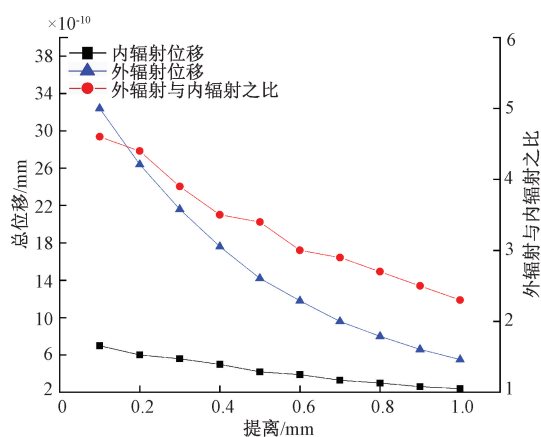


图12 OUT-EMAT 提离对比

Fig. 12 OUT-EMAT lift-off comparison

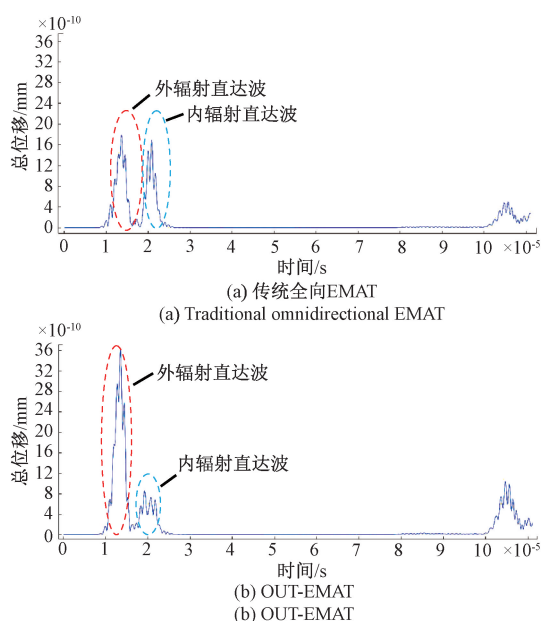


图13 传统全向换能器与 OUT-EMAT 对比

Fig. 13 Comparison of conventional omnidirectional transducer and OUT-EMAT

如图13所示,传统全向 EMAT 内、外辐射总位移相同为 18×10^{-10} mm, OUT-EMAT 内辐射总位移为 8×10^{-10} mm,外辐射总位移为 36×10^{-10} mm。OUT-EMAT 与传统换能器结构相比,外辐射波幅增强了 100%,内辐射波幅抑制了 55.6%。

3.2 反射回波有限元分析

包含裂纹缺陷的有限元仿真模型图14所示。模型中,裂纹缺陷为宽 0.2 mm,长 3 mm,分布在全向线圈外部 100 mm 处。钕铁硼永磁铁尺寸为 10 mm×5 mm,剩磁为 1.4 T,静磁场方向为垂直方向。钢板长度为 300 mm,厚度为 14 mm,杨氏模量为 210 GPa,泊松比为

0.3,密度为 7800 kg/m^3 。线圈 O1、O2 线间距为 3 mm,即 OUT-EMAT 线圈相邻导线间距为 1.5 mm,工作导线铜带长 0.2 mm、宽 0.05 mm, L_1 为 20 mm, L_2 为 100 mm。OUT-EMAT 中全向线圈通入的信号为 $e^{(-5 \cdot (\pi^2) \cdot (0.25^2) \cdot (5e5^2) / (\log(10)) \cdot (t-10^{-6})^2) \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot (5e5) \cdot (t-10^{-6})) \cdot 15}$ 。

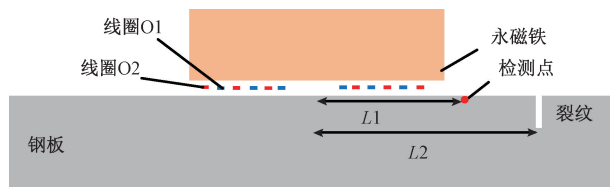


图14 裂纹缺陷的有限元模型示意图

Fig. 14 Diagram of finite element model of crack defect

换能器激励频率参数为 0.45 MHz,两路电压分别为 15、23 V,提离为 0.1 mm,激励的全向导波遇裂纹缺陷形成的反射回波位移云图分布如图15所示。

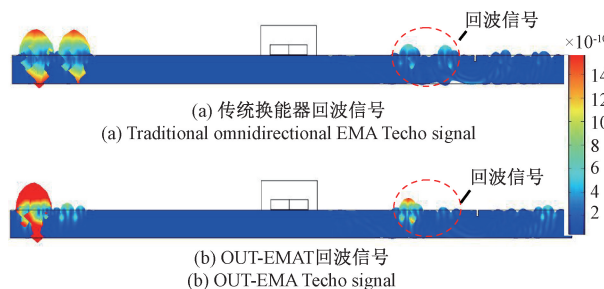


图15 裂纹缺陷反射回波位移云图

Fig. 15 Nephogram of reflected echo displacement of crack defect

如图15所示,传统全向换能器所激励全向导波遇裂纹缺陷时有明显的两次回波,OUT-EMAT 所激励的全向导波仅有一次明显的回波,降低了回波复杂程度。在距换能器中心 20 mm 处设置检测点,回波信号总波动位移具体数值分析如图16所示。

如图16所示,传统全向 EMAT 回波信号幅值可近似为 1:1。根据 OUT-EMAT 和传统全向 EMAT 对比可知 OUT-EMAT 外辐射回波信号明显增强,内辐射回波被抑制,可视为仅发生一次回波反射。

对 OUT-EMAT 回波分析,检测点直达波时间约为 14 μs ,裂纹缺陷反射回波时间约为 68 μs 。理论直达波与反射回波距离 160 mm。结合式(23)和实际得到的时间计算实际值^[25]。

$$s = v \times t \quad (23)$$

式中: s 为声程, v 为全向导波声速(全向导波声速为 2980 m/s), t 为时间间隔。

根据 0.45 MHz 频率与 14 mm 的板厚,结合全向导波声速 2980 m/s,可知该全向导波为兰姆波 S0 模态。

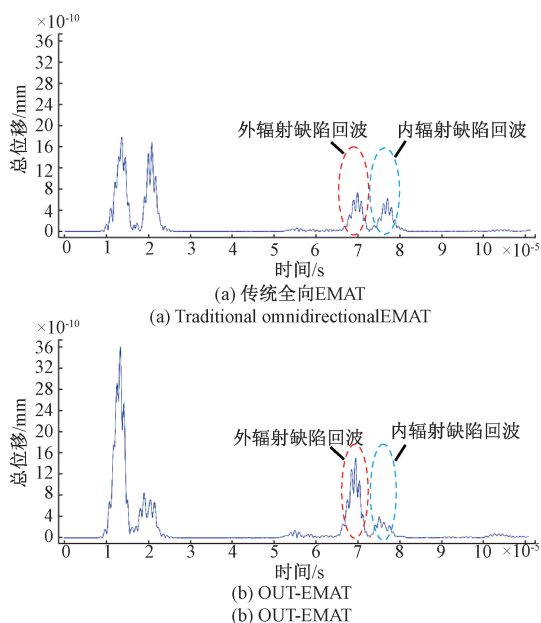


图 16 换能器回波信号分析示意图

Fig. 16 Diagram of transducer echo signal analysis

经计算实际距离 160.92 mm 约为 160 mm, 实际直达波与反射回波距离与理论距离基本相似, 可证明 OUT-EMAT 可检测裂纹缺陷。

综上, 当激励线圈 O2 中电流激励时间延迟线圈 O1 中电流激励时间为 $T/4$, 且激励线圈 O2 与线圈 O1 相邻导线之间间距为 $\lambda/4$ 时, OUT-EMAT 激励的外辐射全向导波幅值增强且内辐射全向导波被抑制。可实现全向导波外辐射控制降低回波复杂程度同时增强裂纹缺陷回波信号信噪比。

4 实验研究与分析

为验证改进后 OUT-EMAT 结构激励的全向导波内辐射抑制、外辐射增强和对裂纹的检测能力, 搭建实验系统如图 17 所示。

实验研究中, 采用收发一体检测方式, 接收线圈在发射线圈正下方。永磁铁长 50 mm, 宽 50 mm, 厚度 30 mm; 钢板长 3 000 mm, 宽 1 500 mm, 厚度 14 mm。新型全向线圈如图 18 所示。

实验中, 激励换能器分别采用传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT。RITEC-5000 产生高频脉冲, 输出两路激励信号, 分别作用于 OUT-EMAT 线圈 O1 与线圈 O2。接收线圈将波动位移转化为电信号, 经阻抗匹配与前置放大后输入 RITEC-RAM5000, 由示波器显示回波信号。换能器激励频率参数为 0.45 MHz, 电压为 200 V 下分别进行 OUT-EMAT 外辐射增强、内辐射抑制的验证实验与 OUT-EMAT 裂纹检测实验, 并与传统全向 EMAT 进行对比。

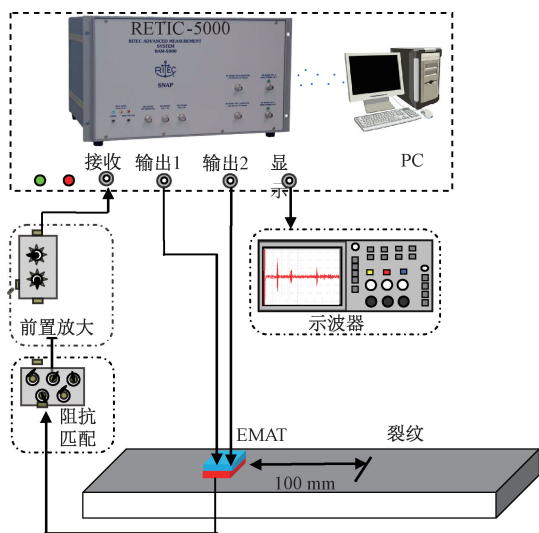


图 17 实验系统

Fig. 17 The experimental system

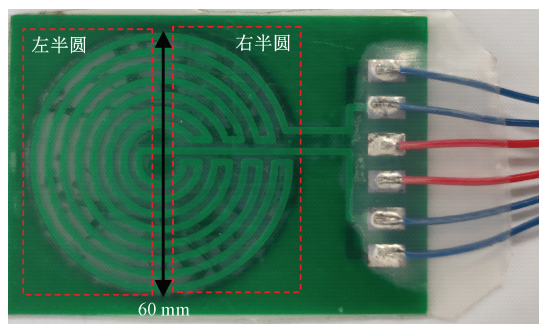
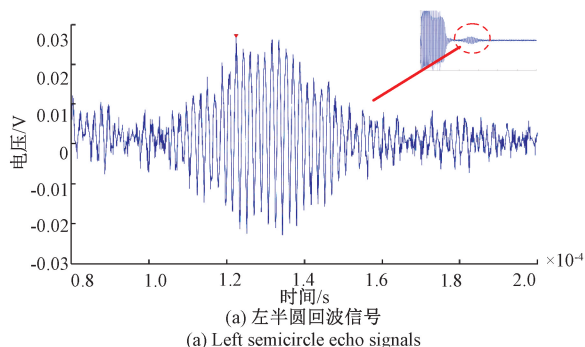


图 18 OUT-EMAT 线圈

Fig. 18 OUT-EMAT coil

4.1 OUT-EMAT 内、外辐射控制

传统全向线圈为轴对称结构, 可分为左右半圆, 为验证传统全向 EMAT 内、外辐射存在, 将传统全向 EMAT 置于钢板上, 将永磁铁置于左右半圆线圈上方, 使左右半圆线圈单独工作。线圈左侧端面具体回波信号如图 19 所示。

(a) 左半圆回波信号
(a) Left semicircle echo signals

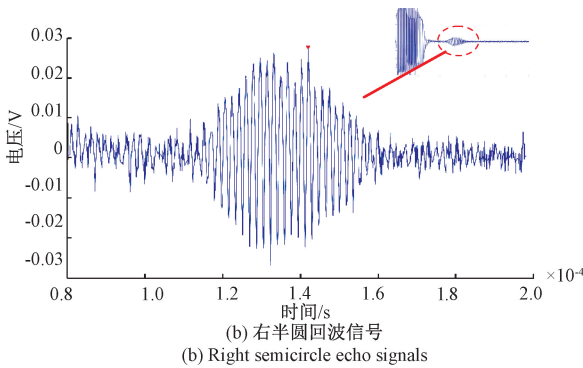


图 19 传统全向 EMAT 左右半圆回波信号

Fig. 19 Traditional omnidirectional EMAT semicircle echo signals

如图 19 所示,左右半圆单独工作时,经左侧端面反射的回波信号出现峰值的时间不同,左半圆工作时出现峰值的时间为 $122.49 \mu\text{s}$,峰值为 0.027 V ,右半圆工作时出现峰值的时间为 $142.92 \mu\text{s}$,峰值为 0.029 V 。根据式 (23) 计算左右半圆出现峰值的时间间隔对应的距离为 60.88 mm ,与全向线圈直径 60 mm 相同,且幅值比 $1:1$,故传统全向 EMAT 内、外辐射存在,但由于线圈本身结构原因导致内、外辐射融合。

为验证 OUT-EMAT 内、外辐射控制,将传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT 分别置于钢板上,进行传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT 对比实验,验证 OUT-EMAT 外辐射增强、内辐射抑制。检测回波如图 20 所示。

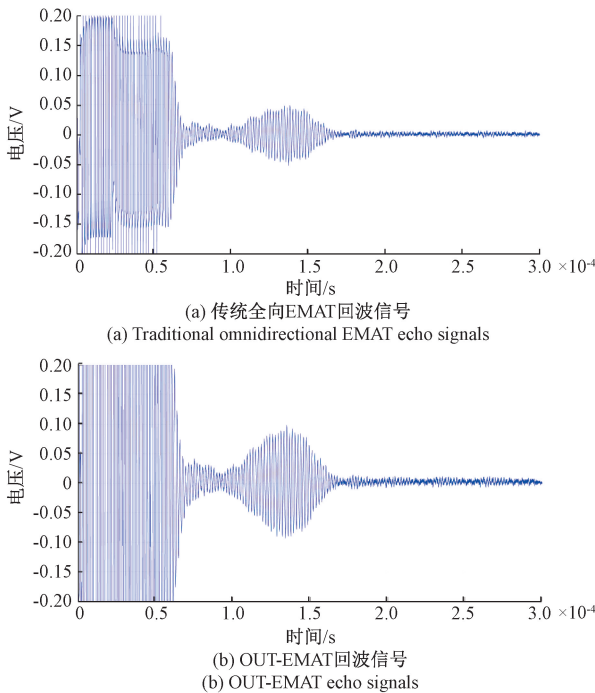


图 20 传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT 回波信号

Fig. 20 Traditional omnidirectional EMAT and OUT-EMAT echo signals

图 20 中,OUT-EMAT 外辐射信号增强了 98.6% ,内辐射信号得到有效抑制。

4.2 OUT-EMAT 裂纹检测

OUT-EMAT 裂纹检测实验中,将传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT 分别置于钢板上,在距换能器 100 mm 处存在裂纹,进行传统全向 EMAT 与 OUT-EMAT 对比实验,验证 OUT-EMAT 裂纹检测能力。OUT-EMAT 裂纹检测回波如图 21 所示。

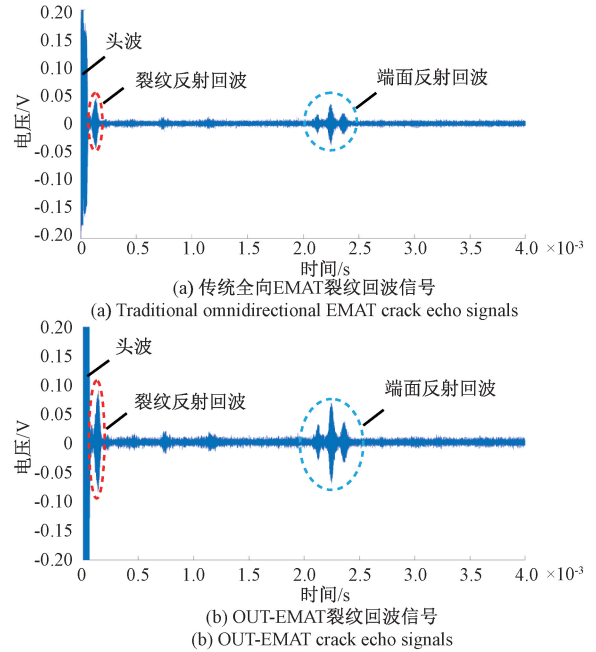
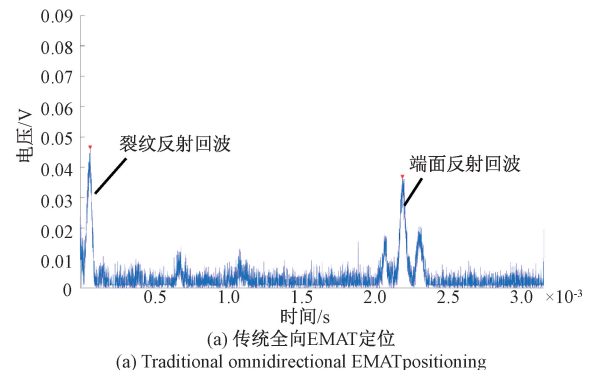


图 21 裂纹回波信号

Fig. 21 Crack echo signal

如图 21 所示,OUT-EMAT 裂纹回波信号相比于传统全向 EMAT 裂纹回波信号幅度明显增强,回波复杂程度降低峰值点更加明确,裂纹缺陷定位更加准确,通过正半波峰值点提取算法进行裂纹缺陷定位如图 22 所示。根据正半波峰值点提取算法计算传统全向 EMAT 传播时间为 $71.54 \mu\text{s}$,OUT-EMAT 传播时间为 $69.72 \mu\text{s}$,结合兰姆波 S_0 模态声速 2980 m/s ,根据式 (23) 计算换能器距裂纹位置分别为 106.6 mm 、 103.9 mm ,故 OUT-EMAT 更接近真实值 100 mm ,定位更为精确。



(a) Traditional omnidirectional EMAT positioning

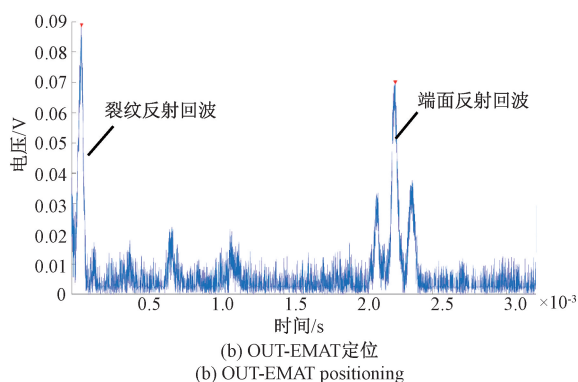


图 22 裂纹缺陷定位

Fig. 22 Crack defect positioning

5 结 论

针对钢板中传统全向 EMAT 回波复杂且回波信号信噪比低,且裂纹缺陷回波信号无法精确识别易引起裂纹缺陷误判的问题,设计一种外辐射 OUT-EMAT 结构。通过对 OUT-EMAT 换能机理分析,建立波动位移叠加的数学模型,得出换能器中两线圈声波波动位移叠加关系,通过调整两线圈相邻导线间距与激励延迟时间,实现外辐射导波幅值增强和内辐射导波幅值抑制。研究结果表明:

1) OUT-EMAT 中两线圈声波波动位移建模分析可知双激励线圈延时时间为 $T/4$,相邻导线之间间距为 $\lambda/4$ 时可实现激励的全向导波外辐射增强和内辐射抑制。

2) 通过对 OUT-EMAT 分析可知,与传统全向 EMAT 相比,OUT-EMAT 内、外辐射导波强度之比由 1:1 变为 2:9;其外辐射导波强度增加了 100%,内辐射导波强度抑制了 55.6%。

3) 与传统全向 EMAT 相比,OUT-EMAT 激励的全向导波遇到裂纹时由于内辐射受到抑制,可降低回波复杂程度,使裂纹缺陷定位更加准确,为精确识别裂纹缺陷提供了一种新方法。

参考文献

- [1] 陈灵,徐建成,吴键,等. 超声导波在缺陷弯管上的数值模拟研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6): 64-67.
CHEN L, XU J CH, WU J, et al. Numerical simulation of ultrasonic conductive waves on defective elbows[J]. Machine Building and Automation, 2021, 50(6): 64-67.
- [2] 杨鹏. 超声导波检测技术在压力管道检测中的应用[J]. 化工管理, 2021, 30: 67-68.
YANG P. Application of ultrasonic guided wave detection

technology in pressure pipeline detection[J]. Chemical Management, 2021, 30: 67-68.

- [3] WANG R, WU Q, YU F M, et al. Nonlinear ultrasonic detection for evaluating fatigue crack in metal plate[J]. Structural Health Monitoring, 2019, 18(3): 869-881.
- [4] 贾九红,刘天阳,刘学成,等. 基于周向 SH0 导波的管道轴向缺陷定量表征[J]. 应用声学, 2020, 39(4): 581-588.
JIA J H, LIU T Y, LIU X CH, et al. Quantitative characterization of axial defects in pipes based on circumferential SH0 waves[J]. Application of Acoustic, 2020, 39(4): 581-588.
- [5] 韦远根,韩赞东,郭大勇. 城市燃气管道壁厚电磁超声在线检测系统研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(11): 73-77, 120.
WEI Y G, HAN Z D, GUO D Y. Research on online electromagnetic ultrasonic testing system for wall thickness of urban gas pipeline[J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2021(11): 73-77, 120.
- [6] ZHANG Y H, LIU W L, LI N, et al. Design of a new type of omnidirectional shear-horizontal EMAT by the use of half-ring magnets and PCB technology[J]. Ultrasonics, 2021, 115: 106465.
- [7] HWANJEONG C, SUNGHO C, CLIFF J, et al. Nondestructive inspection results from mockups of spent nuclear fuel storage canisters using shear-horizontal waves generated by an electromagnetic acoustic transducer[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems, 2020, 3(2): 021001.
- [8] 张佳,杨理践,邢燕好,等. 钢板中电磁超声导波换能器主声束方向研究[J]. 仪表技术与传感器, 2021(7): 10-15.
ZHANG J, YANG L J, XING Y H, et al. Study on direction of main beam of electromagnetic ultrasonic guided wave transducer in steel plate[J]. Instrumentation Technology and Sensors, 2021(7): 10-15.
- [9] 黄松岭,王哲,王坤,等. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 1-12.
HUANG S L, WANG ZH, WANG K, et al. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 1-12.
- [10] PAN Q X, PAN R P, SHAO C, et al. Research review of principles and methods for ultrasonic measurement of axial stress in bolts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2020, 33(1): 1-16.

- [11] 杨理践, 邢燕好, 张佳, 等. 电磁超声导波在管道中螺旋向传播的机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(11): 60-69.
YANG L J, XING Y H, ZHANG J, et al. Research on spiral propagation mechanism of electromagnetic ultrasonic guided wave in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 60-69.
- [12] LEE J K, KIM Y Y. Tuned double-coil EMATs for omnidirectional symmetric mode Lamb wave generation[J]. NDT & E International, 2016, 83(1): 38-47.
- [13] LIU Z H, HU Y N, XIE M W, et al. Development of omnidirectional A0 mode EMAT employing a concentric permanent magnet pairs with opposite polarity for plate inspection[J]. NDT & E International, 2018, 94(1): 13-21.
- [14] LIU Z H, DENG L M, ZHANG Y C, et al. Development of an omnidirectional magnetic concentrator type electromagnetic acoustic transducer [J]. NDT & E International, 2020, 109: 102193.
- [15] KIM K, LEE H J, LEE J K, et al. Effects of slits in a patch of omnidirectional Lamb-wave MPT on the transducer output[J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(3): 035019.
- [16] YANG L J, ZHANG J, XING Y H, et al. Development of a biaxial grid-coil-type electromagnetic acoustic transducer [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32: 025102.
- [17] SUN W X, LIU G Q, XIA H, et al. A modified design of the omnidirectional EMAT for antisymmetric Lamb wave generation [J]. Sensors Actuators A: Physical, 2018, 282: 251-258.
- [18] KANG L, ZHAO C, STEVE D, et al. Enhancement of ultrasonic signal using a new design of rayleigh-wave electromagnetic acoustic transducer [J]. NDT & E International, 2017, 86: 36-43.
- [19] REN W P, XU K, STENE D, et al. A study of magnetostriction mechanism of EMAT on low-carbon steel at high temperature[J]. NDT & E International, 2019, 101: 34-43.
- [20] ZHANG X D, LIU X C, WU B, et al. An improved analytical model of the magnetostriction-based EMAT of SH0 mode guided wave in a ferromagnetic plate [J]. Ultrasonics, 2020, 108: 106213.
- [21] WANG P, ZHANG Y, YAO E, et al. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostrictive EMAT characteristic parameters[J]. Measurement, 2021, 168: 108187.
- [22] 陈学文, 吴莲, 张家伟, 等. 载流线圈和有限长直螺线管磁场的理论分析与讨论[J]. 大学物理, 2019, 38(10): 23-27.
CHEN X W, WU L, ZHANG J W, et al. Theoretical analysis and discussion on magnetic field of current-carrying coil and finite length straight solenoid [J]. University Physics, 2019, 38(10): 23-27.
- [23] 杨理践, 张佳, 邢燕好, 等. 一种管道中 T(0,1) 模式单向电磁超声换能器[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 98-106.
YANG L J, ZHANG J, XING Y H, et al. A unidirectional T(0,1) mode electromagnetic acoustic transducer in pipeline[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 98-106.
- [24] 许国琛, 邓江勇, 陈振华, 等. 钛合金疲劳裂纹的线性和非线性超声综合定量检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(2): 196-202.
XU G CH, DENG J Y, CHEN ZH H, et al. The combined detection technology of the linear and nonlinear ultrasonic for fatigue cracks in titanium alloys [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(2): 196-202.
- [25] 赵佰秋, 孟立新, 于笑楠, 等. 多通道超声的双向单程伪距测量研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9): 174-180.
ZHAO B Q, MENG L X, YU X N, et al. Research on dual one-way pseudorange measurement of multi-channel ultrasound[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9): 174-180.

作者简介



邢燕好, 2002 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2005 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 2018 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学副教授, 主要研究方向为电磁超声检测技术和压电超声波检测技术相关理论及应用、无损检测仪器设计与开发。

E-mail: xingyanhao@126.com

Xing Yanhao received his B.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2002, received his M.Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2005, and received his Ph.D. degree from Shenyang University of Technology in 2018. He is currently an associate professor at Shenyang University of Technology. His main research interests include electromagnetic ultrasonic detection technology, piezoelectric

ultrasonic detection technology theory and application, nondestructive testing equipment design and development.



王振宇, 2016 年于沈阳工业大学获得学士学位, 现为沈阳工业大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声检测技术理论及应用。

E-mail: wangzhenyu1002@126.com

Wang Zhenyu received his B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2016. He is currently a master student at Shenyang University of Technology. His main research interests include electromagnetic ultrasonic detection technology theory and application.



张佳(通信作者), 2012 年于黑龙江科技大学获得学士学位, 2015 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 2021 年于沈阳工业大学获得博士学位, 现为沈阳工业大学讲师, 主要研究方向为电磁超声检测技术、压电超声检测技术理论及应用。

E-mail: zhangjia0929@126.com

Zhang Jia (Corresponding author) received her B. Sc. degree from Heilongjiang University of Science and Technology in 2012, received her M. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2015, and received her Ph. D. degree from Shenyang University of Technology in 2021. She is currently a lecturer at Shenyang University of Technology. Her main research

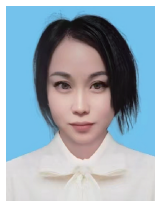
interests include electromagnetic ultrasonic detection technology, piezoelectric ultrasonic detection technology theory and application.



孙盈, 2014 年于哈尔滨理工大学远东学院获得学士学位, 现为中国兵器工业集团航空弹药研究院有限公司中级工程师, 主要研究方向为武器装备电性能检测。

E-mail: 284621825@qq.com

Sun Ying received his B. Sc. degree from Far East College of Harbin University of Technology in 2014. He is currently an intermediate engineer at China North Industries Group Aviation Ammunition Research Institute Co., Ltd. His main research direction is electrical performance testing of weapons and equipment.



金香, 2003 年于沈阳工业大学获得学士学位, 2006 年于沈阳工业大学获得硕士学位, 现为包头师范学院教授, 主要研究方向为智能仪器及凝聚态物理。

E-mail: jin122120@163.com

Jin Xiang received her B. Sc. degree from Shenyang University of Technology in 2003, and received her M. Sc. degree in 2006 from Shenyang University of Technology. She is currently a professor at Baotou Teachers College. Her main research interests include intelligent instrument and condensed matter physics.